

УДК 621.791.01: 536.2

УДК 681.5.033.5

А. Ю. БОНДАРЕНКО, И. И. КЛЮЧНИК, А. Д. БЕМБЕЛЬ**ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ**

В работе рассматриваются динамические характеристики пирозлектрических детекторов, а именно переходные процессы при их реакции на импульсное тепловое воздействие. Отмечены особенности переходных характеристик как при нагревании, так и при охлаждении детектора. Полученные зависимости использованы при разработке симулятора пирозлектрического преобразователя, с помощью которого возможен анализ и визуализация характеристик как существующих детекторов, так и вновь разрабатываемых. Указаны примеры использования пиродетекторов, для которых переходные характеристики наиболее важны. Разработанный симулятор может быть использован и в учебных целях.

Ключевые слова: пирозлектрический детектор, переходной процесс, тепловой поток, пирозлектрический ток, выходное напряжение пиродетектора, симулятор пирозлектрического преобразователя.

О. Ю. БОНДАРЕНКО, І. І. КЛЮЧНИК, О. Д. БЕМБЕЛЬ**ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИХ ДЕТЕКТОРІВ**

У роботі розглядаються динамічні характеристики піроелектричних детекторів, а саме перехідні процеси при їх реакції на імпульсну теплову дію. Відмічені особливості перехідних характеристик як при нагріванні так і при охолодженні детектора. Отримані залежності використані при розробці симулятора піроелектричного перетворювача, за допомогою якого можливий аналіз і візуалізація характеристик як існуючих детекторів, так і тих, що розробляються знову. Вказані приклади використання піродетекторів, для яких перехідні характеристики найбільш важливі. Розроблений симулятор може бути використаний і в учбових цілях.

Ключові слова: піроелектричний детектор, перехідний процес, тепловий потік, піроелектричний струм, вихідна напруга піродетектора, симулятор піроелектричного перетворювача.

О. YU. BONDARENKO, I. I. KLYUCHNYK, O. D. BEMBEL**TRANSIENT PROCESSES IN A PYROELECTRIC DETECTOR**

In this paper, we consider the transient characteristics of a standard single-chip pyroelectric detector. Output voltage transients are easy to measure. Direct measurement of the pyroelectric current presents some difficulties, associated primarily with a sharp jump in the initial crystal current and the input capacitance of the measuring device. Direct measurement of the crystal temperature is impossible, so it can be obtained either by modeling based on known processes, or by mathematical transformations of the results of measuring the thermal time constant with respect to the pyroelectric current. Dynamic characteristics in the time domain, particularly, transient responses are considered. Specificities of transient responses when the detector is heated and cooled, are noted. Results obtained applied to a simulator of a pyroelectric detector. The simulator plots the transient responses. It allows to change a number of parameters to receive new results. The latter is important for not only modeling or analysis existing devices, but also designing new ones. Some applications of pyroelectric detectors are pointed. The simulator is free and can be used in labs at the Universities, or anywhere in the world. Identification of differences between the movement of a person and, for example, the movement of ascending heated air currents or cold drafts in motion sensors occurs precisely in the transient response of the detector output voltage, decomposition of which into Fourier series, in this case, is unacceptable. Thus, for a number of applications of pyroelectric detectors, the problem of research and transient characteristics is relevant. Identification of differences between the movement of a person and, for example, the movement of ascending heated air currents or cold drafts in motion sensors occurs precisely in the transient response of the detector output voltage, decomposition of which into Fourier series, in this case, is unacceptable. Thus, for a number of applications of pyroelectric detectors, the problem of research and transient characteristics is relevant.

Keywords: pyroelectric detector, transient response, heat flow, pyroelectric current, pyroelectric output voltage, simulator of a pyroelectric detector

Введение. Классическая теория пирозлектрического детектора, представленная в 1962 году Джоном Купером [1], содержала ряд динамических моделей, на основе которых построена теплоэлектрическая модель преобразования входного теплового потока в выходной электрический сигнал идеального детектора. В последствии получили развитие как статические, так и динамические модели пирозлектрического детектора [2–4]. Как известно, передаточные функции (динамические модели) действительны лишь для гармонических сигналов [5]. Синусоидальные функции обязательно двуполярны, тогда как измеряемые тепловые потоки принято считать однополярными, причем их форма рассматривается как близкая к прямоугольной. С целью упрощения расчетов и обеспечения энергетической эквивалентности однополярных входных тепловых потоков прямоугольной формы и двуполярных синусоидальных входных сигналов, первые принято разлагать в ряд Фурье с обязательным

выделением несущей гармоники [6]. Для отслеживания переходных процессов используется режим регистрации данных. Регистрация данных позволяет отобразить изменение формы сигнала во времени, а если сигнал непрерывный и периодический, то, при необходимости, разложить его в энергетически эквивалентный ряд Фурье и выделить несущую гармонику. Однако, в целом ряде случаев интерес представляет не спектр сигнала, а реальное изменение формы сигнала во времени. Это важно, например, при разработке датчиков движения, рабочие частоты которых лежат в диапазоне, верхняя граница которого не превышает 1–2 Гц. При проектировании устройств контроля/анализа дыхания человека, длительность вдоха/выдоха которого в спокойном состоянии составляет около 2 с. Кроме того, идентификация различий между движением, собственно, человека и, например, перемещением восходящих нагретых потоков воздуха или холодных сквозняков в датчиках движения происходит именно по переходной

характеристике выходного напряжения детектора, разложение которой в ряд Фурье, ввиду неудовлетворения условиям Дирихле, в этом случае, недопустимо.

Таким образом для целого ряда применений пирозлектрических детекторов задача исследования их переходных характеристик является **актуальной**. В связи с этим целью настоящей статьи, является получение моделей пирозлектрических детекторов, включающих переходные характеристики. Символы, используемые в настоящей работе, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения и единицы измерения физических величин

Символ	Ед. изм	Описание
t	[с]	Время
C_T	[Дж/К]	Тепловая емкость
Ψ_{SE}	[К/с]	Скорость изменения температуры
P_{SE}	[(А с)/(м ² К)]	Пирозлектрический коэффициент
τ_T	[с]	Тепловая постоянная времени
C_E	[Ф]	Электрическая емкость
U_{SE}	[В]	Выходное электрическое напряжение
Φ_{SE}	[Вт]	Тепловой поток
T_{amb}	[К]	Температура окружающей среды
G_T	[Вт/К]	Тепловые потери
I_{SE}	[А]	Пирозлектрический ток
A_{pyro}	[м ²]	Площадь детектора
τ_E	[с]	Электрическая постоянная времени
R_E	[Ом]	Электрическое сопротивление
k_B	[Дж/К]	Постоянная Больцмана
\bar{i}	[А ²]	Ток шума
\bar{u}	[В ²]	Напряжение шума
i_g	[А]	Ток затвора
e	[Кл]	Элементарный заряд
g_{fs}	[См]	Проводимость канала

Математическое описание. Дифференциальное уравнение изменения температуры чувствительного элемента имеет вид [6]:

$$\tau_T \frac{d\Delta T_{SE}(t)}{dt} + \Delta T_{SE}(t) = \pm \frac{\alpha}{G_T} \Delta \Phi_{SE}(t), \quad (1)$$

Для случая, когда температура источника излучения выше температуры детектора, переходный процесс последнего описывается уравнением

$$\Delta T_{SE,positive}(t) = \frac{\alpha}{G_T} \Delta \Phi_{SE}(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (2)$$

Когда температура объекта измерения ниже температуры чувствительного элемента, то охлаждение происходит по закону

$$\Delta T_{SE,negative}(t) = -\frac{\alpha}{G_T} \Delta \Phi_{SE}(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (3)$$

На рис. 1 (а, б) представлены нормированные графики прироста и спада температуры чувствительного элемента в зависимости от разности температур источника излучения и детектора.

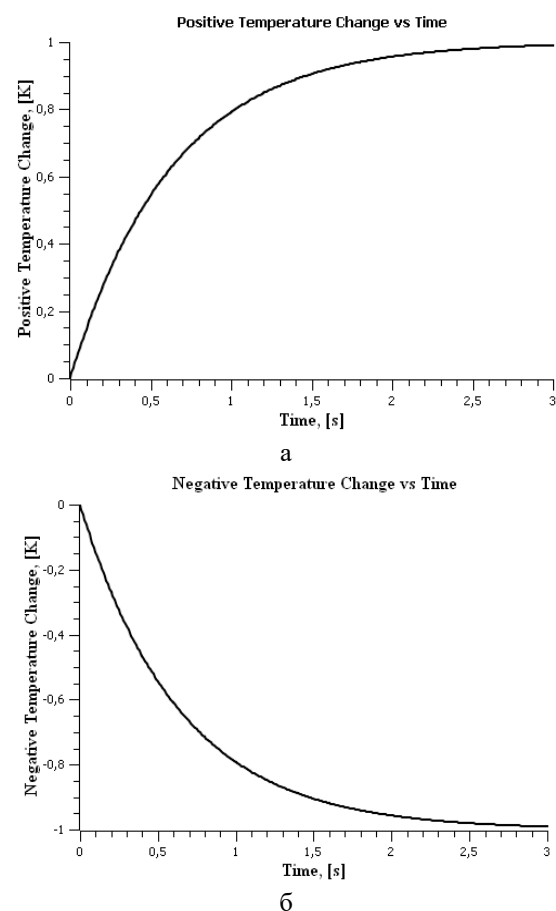


Рис.1 – Расчетные нормированные значения изменения температуры как отклик на тепловые потоки: а – детектор нагревается и б – детектор охлаждается. Параметр: тепловая постоянная времени $\tau_T = 0.637$ (серия моделей 400, 404, 406, 408; производитель Eltec Instruments/Silverlight, США/Швейцария)

Другим важным параметром, который широко не рассматривается в литературе, но упоминается в [7], является скорость изменения температуры. Этот параметр является важным, поскольку, пирозлектрический детектор откликается не на само изменение температуры чувствительного элемента, а именно на скорость ее изменения. Однако, несмотря на

это, скорость изменения температуры чувствительного элемента должна быть, по возможности, несущественной, т.к. большие значения этого параметра могут привести к повреждению детектора [7]. Дифференциальное уравнение скорости изменения температуры может быть записано в виде

$$\tau_T \frac{d\Delta\Psi_{SE}(t)}{dt} + \Delta\Psi_{SE}(t) = \frac{\alpha}{G_T} \frac{d\Delta\Phi_{SE}(t)}{dt}, \quad (4)$$

его решение дает переходную характеристику

$$\Delta\Psi_{SE}(t) = \left| \frac{\alpha}{C_T} \Delta\Phi_{SE}(t) e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right|. \quad (5)$$

Очевидно, что скорость изменения температуры чувствительного элемента является первой производной изменения его температуры по времени, поэтому эта величина не имеет знака и берется по модулю.

Следующим важным параметром является генерация пирозлектрического тока, который прямо пропорционален скорости изменения температуры чувствительного элемента, дифференциальное уравнение которого представлено ниже

$$\tau_T \frac{d\Delta I_{SE}(t)}{dt} + \Delta I_{SE}(t) = \pm p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha}{G_T} \frac{d\Delta\Phi_{SE}(t)}{dt}, \quad (6)$$

где при положительном тепловом потоке пирозлектрический ток в переходном процессе описывается функцией вида

$$\Delta I_{SE,positive}(t) = p_{SE} A_{SE} \Delta\Psi_{SE}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha}{C_T} \Delta\Phi_{SE}(t) e^{-\frac{t}{\tau_T}}, \quad (7)$$

а при отрицательном

$$\Delta I_{SE,negative}(t) = -p_{SE} A_{SE} \Delta\Psi_{SE}(t) = -p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha}{C_T} \Delta\Phi_{SE}(t) e^{-\frac{t}{\tau_T}}. \quad (8)$$

Нормированные временные зависимости пирозлектрического тока от разности температур источника излучения и детектора представлены на рис. 2.

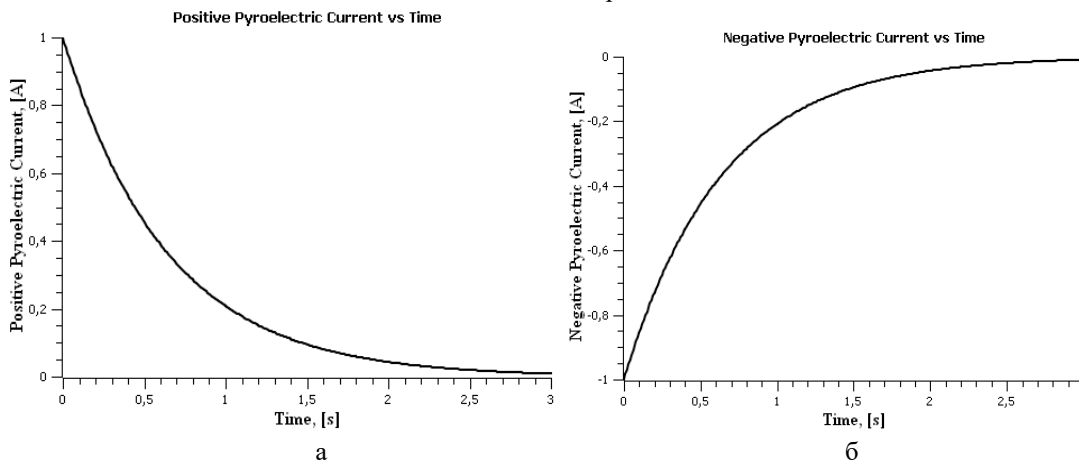


Рис. 2 – Расчетные нормированные значения пирозлектрического тока как отклик на тепловые потоки: а – положительный и б – отрицательный. Параметр: тепловая постоянная времени $\tau_T = 0.637$ (серия моделей 400, 404, 406, 408; производитель Eltec Instruments/Silverlight, США/Швейцария)

Чувствительный элемент, как правило, подключается либо к высокоимпедансному преобразователю сопротивления, выполненному на полевом транзисторе, либо к преобразователю тока-напряжение на операционном усилителе. В обоих случаях выходным сигналом детектора является напряжение, дифференциальное уравнение которого имеет вид

$$\tau_T \tau_E \frac{d^2 \Delta U_{SE}(t)}{dt^2} + (\tau_T + \tau_E) \frac{d\Delta U_{SE}(t)}{dt} + \Delta U_{SE}(t) = \pm \frac{p_{SE} A_{SE} R_E}{G_T} \frac{d\Delta\Phi_{SE}(t)}{dt}. \quad (9)$$

Принимая во внимание два режима работы детектора и два знака теплового потока, для выходного напряжения существует четыре различных случая, каждый из которых описывается следующим уравнением:

– режим работы по напряжению, тепловой поток положительный

$$\Delta U_{SE,VM,positive}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta\Phi_{SE}(t)}{G_T} \times \left(\frac{1}{\tau_T - \tau_{E,VM}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{E,VM}}} - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) \right); \quad (10)$$

– режим работы по напряжению, тепловой поток отрицательный

$$\Delta U_{SE,VM,negative}(t) = -p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta\Phi_{SE}(t)}{G_T} \times \quad (11)$$

$$R_{E,Bias} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,VM}} \left(e^{\frac{t}{\tau_{E,VM}}} - e^{\frac{t}{\tau_T}} \right);$$

– режим работы по току, тепловой поток положительный

$$\Delta U_{SE,CM,positive}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta \Phi_{SE}(t)}{G_T} \times R_{E,Fb} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,CM}} \left(e^{\frac{t}{\tau_{E,CM}}} - e^{\frac{t}{\tau_T}} \right); \quad (12)$$

– режим работы по току, тепловой поток отрицательный

$$\Delta U_{SE,CM,negative}(t) = -p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta \Phi_{SE}(t)}{G_T} \times R_{E,Fb} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,CM}} \left(e^{\frac{t}{\tau_{E,CM}}} - e^{\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (13)$$

Все четыре случая представлены на графиках рисунка 3 в нормированном виде.

Хотя математически все четыре уравнения (10 – 13) похожи, переходные характеристики, которые они представляют, как видно из приведенных графиков, различны. Это различие поясняется тем, что электрическая постоянная времени детектора в режиме работы по напряжению приблизительно на два порядка больше электрической постоянной времени в режиме работы по току

$$\tau_{E,VM} \gg \tau_{E,CM}, \quad (14)$$

поэтому наблюдается различие не только в полярности сигнала, но и по времени, при котором выходное напряжение достигает своего экстремума.

Важным параметром пьезоэлектрических детекторов является отношение изменения выходного сигнала детектора к изменению входного, т.е. чувствительность. Поскольку выходным сигналом детектора может служить либо ток, либо напряжение, то, следовательно, различают две чувствительности: по току

$$\Delta R_{\frac{A}{W}}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{1}{C_T} e^{\frac{t}{\tau_T}} \quad (15)$$

и по напряжению

$$\Delta R_{\frac{V}{W}}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{1}{G_T} \times R_{E,Bias} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,VM}} \left(e^{\frac{t}{\tau_{E,VM}}} - e^{\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (16)$$

Переходная характеристика вольт-ваттной чувствительности детектора нелинейная и в некоторый момент времени имеет ярко выраженный максимум. Максимальная чувствительность пьезоэлектрического детектора достигается в упомянутый момент времени в случае, если тепловой поток описывается ступенчатой функцией Хевисайда.

Таким образом, для пьезоэлектрического детектора определены переходные характеристики всех стадий преобразования теплового сигнала в электрический.

Выводы. В настоящей работе рассмотрены переходные характеристики стандартного однокристалльного пьезоэлектрического детектора. Переходные процессы выходного напряжения легко поддаются измерению. Прямое измерение пьезоэлектрического тока представляет некоторые трудности, связанные, в первую очередь, с резким скачком начального тока кристалла и входной емкостью измерительного прибора. Прямое измерение температуры кристалла невозможно, поэтому оно может быть получено либо моделированием на основе известных процессов, либо путем математических преобразований результатов измерения тепловой постоянной времени по пьезоэлектрическому току.

Применение. На основе полученных математических моделей разработан модуль переходных процессов симулятора режимов работы пьезоэлектрического преобразователя.

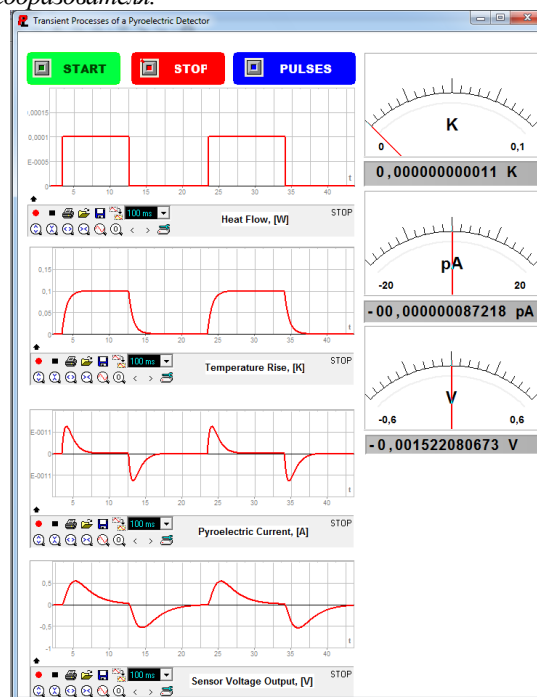


Рис. 3 – Симулятор работы пьезоэлектрического детектора (Profilab Expert ver. 4.0, обладатель лицензии: А. Бондаренко)

Программное обеспечение, используемое в настоящей статье, электронная таблица LibreOffice Calc <https://www.libreoffice.org/> с открытым исходным кодом, средство анализа данных SciDAVis <http://scidavis.sourceforge.net/>, также с открытым исходным кодом. Интерфейс программы, представленный на рис. 3, состоит из четырех графиков, каждый из которых

отображает тепловой поток, прирост температуры чувствительного элемента, пьезоэлектрический ток и выходное напряжение, соответственно. Все графики промаркированы соответствующими единицами измерения. Этот контроллер симулирует изменение температуры чувствительного элемента. Каждый последующий параметр симулируется собственным контроллером. Последний контроллер – контроллер выходного напряжения, симулирует работу осциллографа (или АЦП). Данный симулятор может быть использован с целью более глубокого понимания переходных процессов, происходящих в пьезоэлектрическом детекторе. Симулятор выполнен в среде разработки Profilab Expert ver. 4.0.

Список литературы

1. Cooper J. Minimum detectable power of a pyroelectric thermal receiver. – Rev. Sci. Instr. 33. – 1962. – P. 92–95.
2. Бондаренко А. Ю. Построение математических моделей пьезоэлектрического детектора. Нагревание. Отклик на единичное ступенчатое воздействие. Системы обработки информации, ХУПС, 2016. – Вып. 146. – С. 111–123.
3. Ключник И. И. Пьезоэлектрические преобразователи энергетических характеристик СВЧ-трактов. / И. И. Ключник, В. С. Жилков. Теория, элементы и узлы антенно-волноводных трактов. Труды научно-теоретической школы по СВЧ-электронике, 1990. – Вып. 1. – С. 120–146.

4. Bondarenko A. Mathematical Modeling of a Pyroelectric Detector, Ivanchenko I.S., Kharkiv, 2018. – 139 p.
5. Holbrook J.G. Laplace transforms for Electronic Engineers, Pergamon Press, 1966. – 364 p.
6. Budzier, H., Gerlach, G. Thermische Infrarotsensoren. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. – 328 p.
7. <http://wolframalpha.com> (6 ноября 2018).
8. http://silverlight.ch/pdf/eltec_400.pdf (6 ноября 2018).

References (transliterated)

1. Cooper J. Minimum detectable power of a pyroelectric thermal receiver. – Rev. Sci. Instr. 33. – 1962. – P. 92–95.
2. Bondarenko A. Yu. Postroenie matematicheskikh modeley piroelektricheskogo detektora. Nagrevaniye. Otklik na ediničnoye stupenchatoje vozdeystviye. Sistemy obrabotki informatsii, KhUPS, 2016. – No. 146. – P. 111–123.
3. Klyuchnyk I. I., Zhilkov V. S. Piroelektricheskije preobrazovateli energeticheskikh kharakteristik SVCh-traktov. Teorija, elementi i uzli antenno-volnovodnih traktov. Trudi nauchno-teoreticheskoy shkoly po SVCh-elektronike, 1990. – No. 1. – P. 120–146.
4. Bondarenko A. Mathematical Modeling of a Pyroelectric Detector, Ivanchenko I.S., Kharkiv, 2018. – 139 p.
5. J.G. Holbrook Laplace transforms for Electronic Engineers, Pergamon Press, 1966. – 364 p.
6. Budzier, H., Gerlach, G. Thermische Infrarotsensoren. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. – 328 p.
7. <http://wolframalpha.com> (November 6, 2018).
8. http://silverlight.ch/pdf/eltec_400.pdf (November 6, 2018).

Поступила (received) 18.11.18

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олександр Юрійович (Бондаренко Александр Юрьевич, Bondarenko Oleksandr Yuriyevych) – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: pyrodetector@gmail.com

Ключник Ігор Іванович (Ключник Игорь Иванович, Klyuchnyk Igor Ivanovich) – кандидат технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: ihor.klyuchnyk@nure.ua

Бембель Олександр Дмитрович (Бембель Александр Дмитриевич, Bembel Oleksandr Dmytrievych) – студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: zarubovich@gmail.com